

部分重複波による Sand wave に関する研究 (1)

杉 江 正 文*・川 口 毅**

1. 緒 言

移動床模型実験を行なうと重複波により Sand wave (dune) が発生することはよく知られている。模型上での地形変化と現地の地形を比較する時、これをどう扱うかは重要な問題であり、Sand wave がどの程度まで発達するか、またその性質を知ることは重要である。

Sand wave にはこれ以外に、港内で静振により発生するもの¹⁾、海峡で潮流により発生するもの²⁾、干潟に見られるような波と流れの相互作用によるもの、現地では確認されていないが周波数の異なる波の相互干渉が原因と考えられるもの³⁾ などがある。水産面から見ると海底地形の形状と対象生物の分布状態には密接な関係がある。特に砂浜海岸では Sand wave が存在するところが多い。その理由として底面流速が変化にともみ、砂が締固まらないうこと。海底砂上層部中の海水交換により砂の中の海水の溶存酸素量が多いことなどが考えられる。したがって Sand wave を人工的に発生させることにより生産性を向上させることも可能である。本研究は実験水路で部分重複波により発達する Sand wave の発達限界を調べたものである。

2. 実験装置と実験方法

実験に用いた水路は図-1 に示す二次元造波水路で長さ 30 m、水路幅 70 cm、高さ 1 m である。一端 10 m 区間は片面ガラス張りである。造波機はフラップタイプである。実験は長さ 4.5 m、砂層厚 40 cm の水平床をつくり末端に反射板を設置して Sand wave の発達過程を調べたものと、勾配 1:15 の移動床海浜模型を 10.5

m の長さにあわせてもうけ、ある一定の特性をもつ波を作用させその海岸変形の過程で生ずる Sand wave の規模を計測したものの二種類である。

移動床材料には標準砂を用いた。中央粒径 $d_{50}=0.2$ mm で真比重は 2.65 である。波高測定は地形測定のため波を止めた後、造波機を動かし 5~6 分して波高の場所的な分布が定常となった時、抵抗線式波高計をつけた 3 cm/sec で定速走行する台車を動かし、電磁オシログラフで波高記録をとり、その包絡線と記録紙の送り速度から場所的な波高分布を出した。水深の浅いところは、ガラス壁から物差により計測した。沖波の波高は水平部で波高計を移動させて部分重複波の最大波高 H_1 、最小波高 H_2 から入射波高 $H_i=(1/2)(H_1+H_2)$ により入射波高を求め水平部の水深から沖波に換算した。反射率 (r) は Hearly の方法 $r=(H_1-H_2)/(H_1+H_2)$ により算出した。

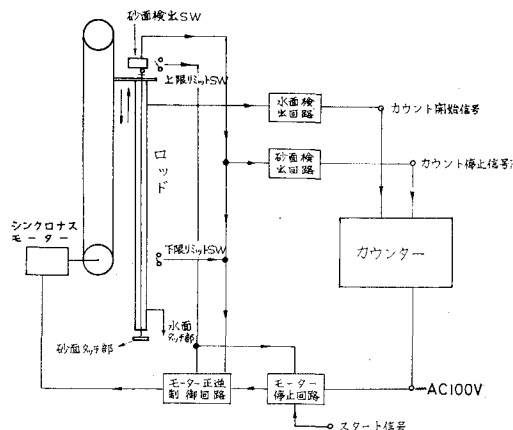


図-2 砂面計

地形変化はポイントゲージと、図-2 に示す計測技研(株)に依頼して作った砂面測定器を使用した。原理はスタート信号によりシンクロナスモーターが作動し、ロッドが一定速度で下降する。ロッドの先端が水面に接すると水面検出信号によりカウントを始め、ロッド先端が砂面につくとリミットスイッチが働きカウ

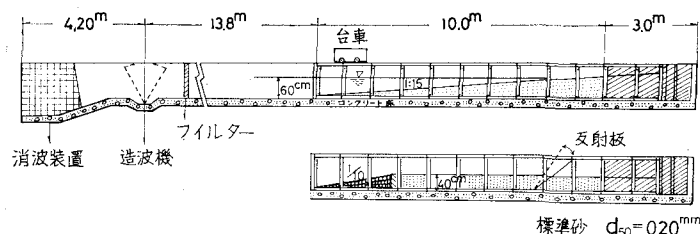


図-1 実験水路

ントを中止するとともにモーターが逆回転し最初の位置までロッドが上昇する。水中でのロッドの下降時間から水深を求めるもので下降速度は50サイクルで 50 mm/sec である。地形変形は水路の中心線沿いに 5 cm 間隔で測定した。測定時間は斜面実験では最初正常海浜を形成する波を 16 時間作用させ海浜形状が安定した状態で波高を変え実験開始後 1, 2, 3, 4, 6, 9, 13, 18 時間の 8 回にわたって行なった。水平床では 1, 2, 4, 6, 8, 10 時間の 6 回である。

3. 現象の考察とデータの処理

実験に用いた波の諸元は表-1 のとおりである。

表-1 実験条件

実験番号	周期 <i>T</i> (sec)	平均水深 $\bar{h}$ (cm)	平均波高 $\bar{H}$ (cm)	平均 反射率 <i>r</i> (%)	Sand wave の平均波高 $\bar{H}_0$ (cm)	備 考
1-1	1.2	14.4	6.4	31	3.5	水平床実験
1-2	1.2	14.4	6.1	21	4.4	"
1-3	1.2	13.4	5.1	28	4.1	"
1-4	1.2	13.5	5.1	30	4.4	"
1-5	1.2	13.3	3.1	39	2.3	" (値はいずれも10時間後のものである)
1-6	1.2	13.4	3.5	46	2.8	"
1-7	1.2	13.0	6.4	29	4.0	"
1-8	1.2	20.4	6.0	47	3.8	"
1-9	1.2	19.9	4.1	60	3.2	"
1-10	1.8	12.5	6.7	34	5.5	"
1-11	1.8	12.5	4.8	36	5.6	"
1-12	1.8	12.8	2.9	42.7	2.0	"
1-13	1.8	12.4	3.8	34.6	2.7	"
1-14	1.8	11.5	6.3	30.7	4.0	"
1-15	1.8	13.1	4.7	30.1	4.8	"
1-16	1.8	19.2	3.9	44	5.5	"
1-17	1.8	18.4	6.3	41.7	7.2	"
1-18	1.8	18.3	4.6	42	4.8	"
1-19	1.8	19.3	5.0	43	6.8	"
1-20	1.8	18.9	2.8	55.5	3.0	"
1-21	1.8	19.6	3.7	50.3	4.5	"

実験番号	<i>T</i> (sec)	H_0	H_0/L_0	<i>r</i> (%)	正常海浜 H_0/L_0	備 考
2-1	1.4	6.2	0.020	15~23	0.007	海浜変形実験
2-2	1.4	8.4	0.027	10~27	0.007	"
2-3	1.4	11.3	0.037	7~24	0.011	"
2-4	1.0	5.6	0.036	10~19	0.015	"

(1) 水平床での Sand wave

水平床ではすべての場合実験開始直後に部分重複波の節のところに砂れんが発達する。砂れんが発達すると vortex のため砂が巻き上げられ浮遊砂の量が増えとともにこの地点の地盤高がしだいに高くなり両側では洗掘が生じ Sand wave が発達してくる。洗掘地点は時間の経過にともない重複波の腹の位置に移行していく。野田^{4),5)}は重複波による質量輸送速度を層流および乱流境界層理論に基づき誘導し砂の移動方向は底質の移動形式、境界層内における逆転層厚、Reynolds 数により決められることを実証している。本実験で *Re* 数を

$$Re = \frac{u(1+r)d_{50}}{\nu}$$
 で計算すると

$0.86 \times 10^2 \sim 2.8 \times 10^2$ で、砂が重複波の腹から節に移動する範囲にあり実験での現象と一致している。この Sand wave は時間とともにその波高が増大するが 6~8 時間で安定した状態になる。これは Sand wave の波形と水粒子の運動がバランスすることを意味している。またこの段階では Sand wave の山での砂の動きは激しく、供給される砂と流速が大きい頂部で浮遊、あるいは掃流形式でけずりとられる砂がバランスしている動的平衡状態で、与えられた条件に対する発達の限界である。また周期 1.8 sec の実験では重複波の腹の位置にも小さな wave が発達する。写真-1 はその一例である。入射波高、反射率、Sand wave の波高は平均値を使用し、波長は山から山までの距離の平均値をとった。

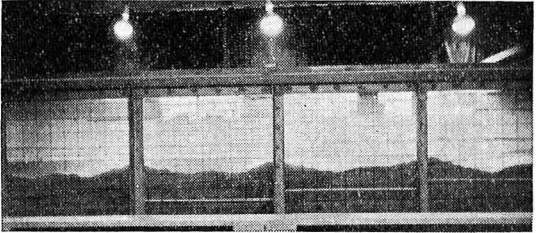


写真-1 発達した Sand wave (1-16)

(2) 海浜変形過程での Sand wave

本実験では非碎波領域での Sand wave は海浜変形のいかんにかかわらず水平床の場合と同様に部分重複波の節に山が形成される。ステップが発達し海底勾配が比較的急になると山は明らかでなくなり節から腹にかけての海底勾配は平均勾配より急になるが平均地形からの増減をとると wave の形が分離できるようである。

碎波帯内ではステップが発達しその長さが長くなるにつれて Sand wave が発達してくる。つまり碎波形式が崩れ波に移行するに伴い発達する。Sand wave の山は波の減衰が顕著である碎波点近傍では重複波の節と腹の中間にあるが、波の減衰がゆるやかになるステップ上では非碎波の場合と同様に節の位置に発達するようである。

これは碎波帯内では戻り流れにより砂が沖側に運ばれていること、碎波点近傍では浮遊砂濃度が大きいことが

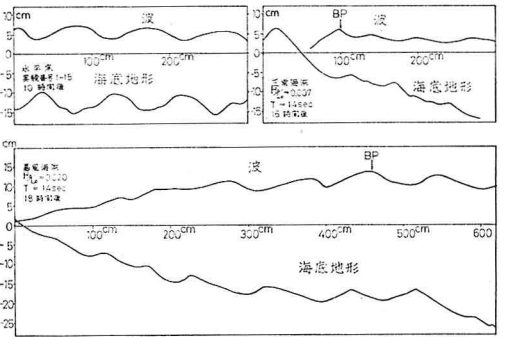


図-3 部分重複波と Sand wave の位置関係

原因と考えられる。図-3 は部分重複波と Sand wave の位置関係の一例である。

(3) 直交多項式による平均地形と Sand wave の分離

砕波点より沖側では平均地形からの出入を考慮すると Sand wave の形が明確になることにヒントを得て Sand wave の分離を行なうことにした。部分重複砕波は砕波後波高を減衰しながら反射波の影響で振動する。またステップの発達とともに Sand wave が発達してくる。そこで見かけの地形は平均地形と Sand wave が単純に重ね合わさったものと仮定してこれらの分離を考えた。波の数は多くて7個程度であり、水深の増加とともに波長が長くなることから分離の方法として直交多項式^{(6),(7)}を使用した。

等間隔にとらわれた n 個の測定値 (X_i, Y_i) , $(i=1, 2, \dots, n)$ があるときこれに $(n-1)$ 次の多項式をあてはめればこれらの関係を完全に表現できるが、 $(n-r)$ 次の多項式ではほとんど大部分の傾向が表現可能となる。

r 次の直交多項式は次のようになる。

$$\begin{aligned} Y_i &= \alpha_0 \phi_0(X_i) + \alpha_1 \phi_1(X_i) + \dots + \alpha_r \phi_r(X_i) + \varepsilon \\ \phi_p(X) &= a_{p0} + a_{p1}X + \dots + a_{pp}X^p \end{aligned}$$

すべての $j, l < n$ に対して

$$\sum_{i=1}^n \phi_j(X_i) \cdot \phi_l(X_i) = \begin{cases} 1 & (j=l) \\ 0 & (j \neq l) \end{cases}$$

..... (1)

これは変数を $\phi_l(X_i)$ としたときの重回帰式の形となっているから一般の回帰模型と同様分散分析を行ない残差分散の有意性を F 分布で検定しながら項数をあげて行くことができる。また、式 (1) に他の項 $\alpha_{r+1} \phi_{r+1}(X)$

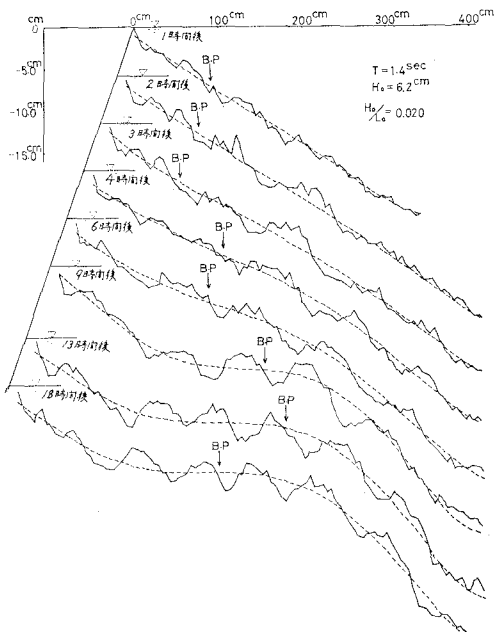


図-4 平均地形と Sand wave の分離

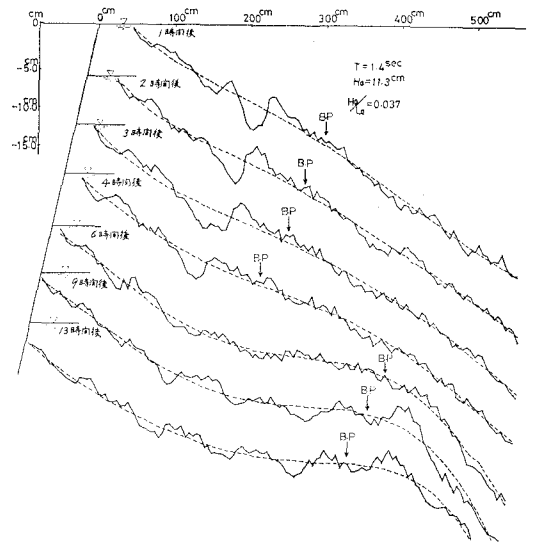


図-5 平均地形と Sand wave の分離

の追加が望ましい場合には多項式の直交性によりすでに得られている係数の再計算は必要でない。図-4,5 はこ

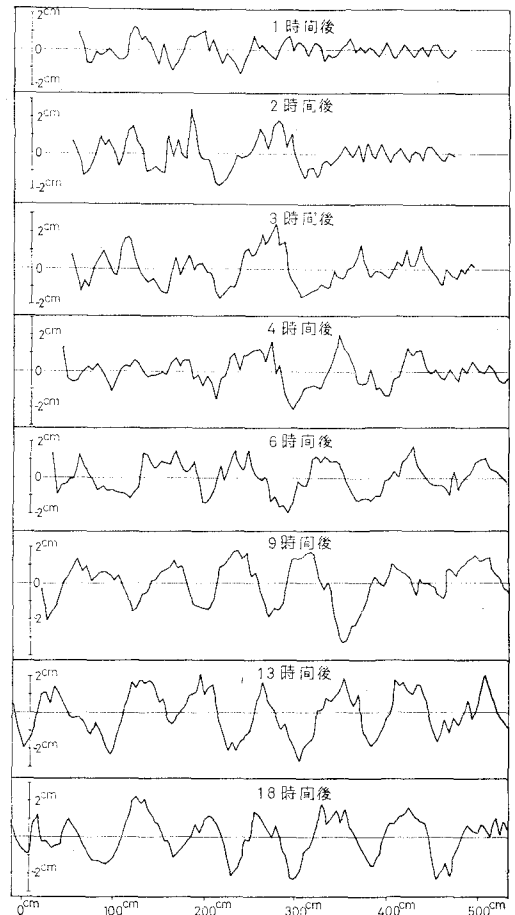


図-6 分離した Sand wave ($T=1.4$ sec, $H_0/L_0=0.020$ の場合)

のようにして平均地形と Sand wave を分離したものである。図 B.P 中は碎波点をあらわす。計算は電子計算機を使用した。最初正常海浜の平衡海浜をつくり暴風海浜形成に相当する波に変わった後の地形変化であるためか入射波高が比較的小さい場合明確な Bar は形成されずステップが発達していく(図-4)。波高が高いとある時間までは明確な Bar が見られるがステップが発達し碎波形式が巻き波から崩れ波に移行していくにつれ Bar は消え Sand wave が発達してくるようである(図-5)。図-6 は分離した波を取出したものである。

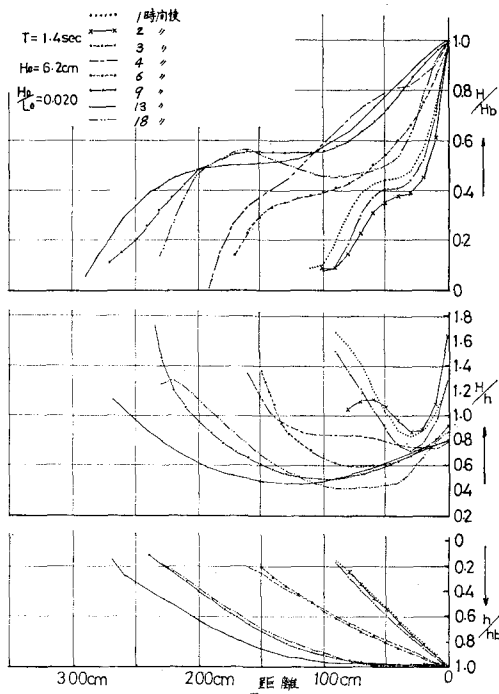


図-7 碎波帯内の波と地形(平均)

碎波後の波に対しても同様の計算を行なった。図-7 はこのようにして求めた碎波後の平均波高と水深の関係を示すものである。海底勾配がゆるやかになるとともに波高減衰は小さくなりステップ上での波高水深比 H/h

の最小値は 0.4~0.5 になる。この段階で Sand wave の発達には著しい。また反射率の影響も認められ、水平部での反射率が大きいときは Sand wave の波高も高いことが確認された。

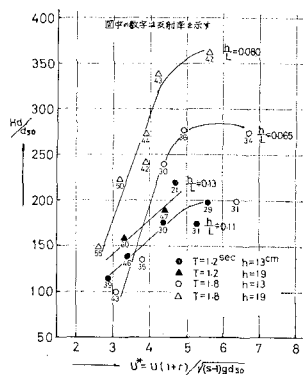
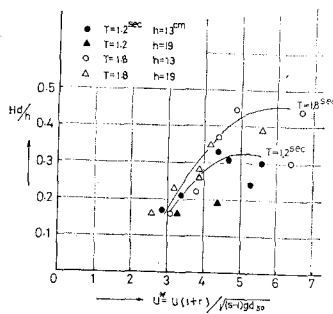
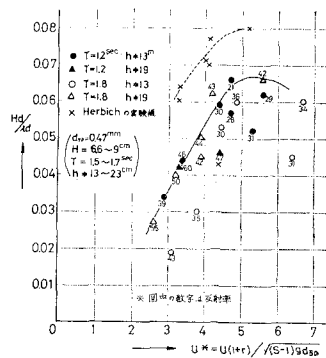
海浜変形過程で生ずる Sand wave の解析は上記のようにして分離したものを使用した。

4. 実験結果と考察

(1) 水平床での Sand wave

データは完全発達と見なせる 10 時間後の値を使用した。水平床での実験結果は 図-8, 9, 10 に示す。いずれも横軸は $u^* = u(1+r)/\sqrt{(S-1)gd_{50}}$ をとった。ここに u : 水粒子最大速度, r : 反射率, S : 砂の比重, d_{50} : 中央粒径である。これは実験の観察から Sand wave が部分重複波の節の位置に発達し、この位置の流速が大きくなるほど波高は高くなるが、発達に限度があること、反射率が大きくなるほど波高が高くなることから選んだものである。この無次元量は部分重複波の節における最大測速 $u(1+r)$ と海底床砂の抵抗の比あるいは最大流速と浮遊砂の沈降速度の比、浮遊砂の量にも関係する底質と流速の関係をもあらわすものである。図-8 は縦軸に H_d/d_{50} をとったものでこの実験では 1 種類の砂しか使用していないので H_d の大きさを直接あらわすものである。この図から、Sand wave の波高は底面最大速度が大きくなるにつれ高くなるが、 $u^* > 5.0$, $(u(1+r) \div 28 \text{ cm/sec})$ になると増加は緩慢になり逆に波高が減少する傾向がみられる。また周期、水深の影響が認められ、底面速度が同じであれば周期が長いほど波高が高く、周期が同じであれば水深が大きいほど発達する。図-9 は H_d/h と u^* の関係を周期をパラメーターとしてまとめたものである。周期による差が明確に出る。

Sand wave の山と山の距離、 $\lambda_d = L/2$ で H_d を割った見かけの波形勾配 H_d/λ_d と u^* の関係を図-10 に示す。周期、水深、反射率による明確な違いは認められなくなり $u^* = 5.0$ 近くで最大波形勾配は $H_d/\lambda_d \div 0.065$ になる。

図-8 H_d/d_{50} と u^* の関係(水平床)図-9 H_d/h と u^* (水平床)図-10 H_d/λ_d と u^* (水平床)

なる。図中点線のもののは Herbach の実験値⁹⁾から H_d/λ_d と u^* を計算してプロットしたものである。 $d_{50}=0.47$ mm, $S=2.65$, $r=12\sim55\%$, $h=12.7\sim22.9$ cm, $T=1.5\sim1.74$ sec, $H=6.2\sim9.5$ cm である。本実験と比較して d_{50} の値が 2 倍近いこと以外では実験条件はほぼ同じである。 H_d/λ_d が大きいのは Sand wave の波高として大きいほうから 1/3 の平均値をとっているためである。この点を考慮に入れると傾向はよく合っている。本実験では $u^*>7.0$ になると碎波が生ずるため完全発達状態を作り出せなかったが塩化ビニール粒子 ($d_{50}=0.13$ mm, $S=1.13$) を用いた野田⁹⁾の反射率 100% の実験値を計算すると重複波の節に砂のたまる場合 $u^*=28.4$, $H_d/\lambda_d=0.022$ ($T=1.7$ sec, $H=3.0$ cm, $h=10$ cm), 腹に砂のたまる場合 $u^*=43.3$, $H_d/\lambda_d=0.032$ ($T=1.5$ sec, $H=15.1$ cm, $h=30$ cm) となり, $u^*=35$ あたりで位置関係が逆転するようにも見えるが Scale effect の問題もあり実験数が少ないためさらに検討したい。

(2) 海浜変形過程で生ずる Sand wave

海浜変形過程で生ずる Sand wave は汀線, 碎波点の位置が変わるため完全発達状態の存在自体に問題はあるが最大どの程度まで発達するかを水平床で非碎波の波により得られた結果を利用してまとめた。 u^* の各値に対する H_d/λ_d の最大値, そのとき同じデータの H_d/h の各値が周期により分離され, しかも最大値であることを目安とした。前述の直交多項式で分離した Sand wave の山の位置での平均水深, 平均波高から底面最大流速を求め, 反射率は水平部での平均反射率を使用した。碎

波点内外で現象が異なるため分離して考えた。

碎波点より沖側の Sand wave

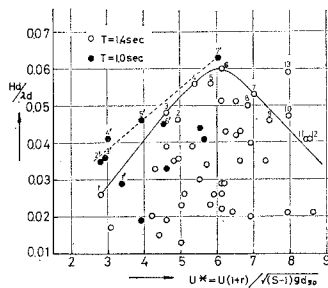
図—11~13 が実験結果である。図中の数字は同一のデータを示し完全発達に近いと見なされるものである。海底勾配の影響も考えられるが, この実験では最大勾配は 1/10 程度である。この範囲内では勾配による違いは認められなかった。しかし波動下における波の安息角の問題もあり海底勾配の影響があるはずであるがデータ数の不足, 実験条件による制約のため明確にはできなかった。実験結果は水平床でのものと変わらないが $u^*\div 6.0$ で最大となる。しかし碎波点近傍での u の計算値の精度を考慮に入れるとほとんど変わらないといえる。したがって地形を直交多項式で得られる平均地形に水平床で得られた特性を持つ Sand wave が重ね合わさったものと見ても大差ないといえる。

碎波帯内の Sand wave

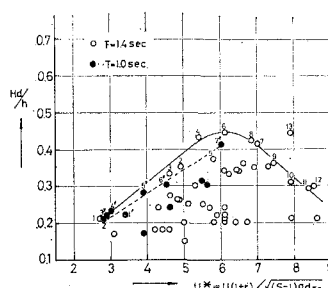
図—5 に見られた明らかにパーであるもの 4 個と初期勾配 1/15 より急斜面にある 1/10 以上のものは除去した。勾配 1/10 以上のものはいずれも汀線付近にあり, 反射の影響より汀線での引き波と遡上波により形成される ridge, runnel を含むからである。1/15 以下のものについては勾配による差は明らかにできなかったが, $u^*>7$ のものはステップが発達し, 海底勾配がゆるやかな段階でのものが多い。

図—14~16 がその結果である。

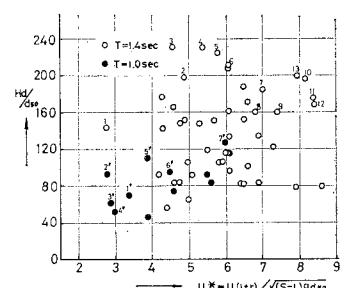
碎波帯内のもはデータが相当ばらつくが $u^*>5.0$ で u^* の増加に伴ない H_d/λ_d , H_d/h の値が減少すること,



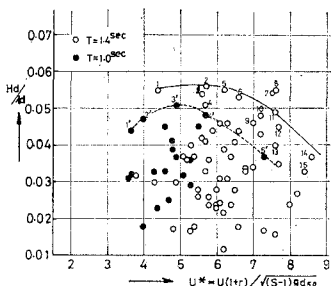
図—11 H_d/λ_d と u^* (碎波前)



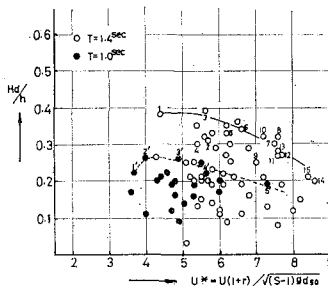
図—12 H_d/h と u^* (碎波前)



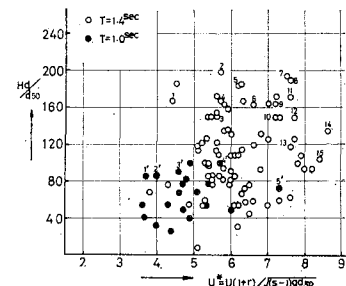
図—13 H_d/d_{50} と u^* (碎波前)



図—14 H_d/λ_d と u^* (碎波帯内)



図—15 H_d/h と u^* (碎波帯内)



図—16 H_d/d_{50} と u^* (碎波帯内)

H_d/λ_d に対する周期の影響が大きいことが特徴である。これは底面に沿う戻り流れの速度、沖側に向う砂の移動量、ステップの長さが周期により異なることなどが理由として考えられる。もちろん u の算定にも問題がある。砕波後の波による底面流速は砕波形式との関連が深いがここでは比較の意味もあるのですべて微小振幅波理論で計算した。崩れ波の下での流速の実験を行なった Méhauté¹⁰⁾ の結果を微小振幅波理論で計算したものと比較してみると H/T^2 の値により変わるが実験値は理論値の 7~8 割程度である。

6. 結 語

以上 2 次元水路で水平床に反射板を設置したときおよび海浜変形の過程で発達する Sand wave の実験結果について考察した。この結果をまとめると、

(1) 非砕波の波では Sand wave の山は部分重複波の節の位置に発達する。砕波帯内の波の減衰の著しいところでは腹と節の中間にあるがステップが発達し $H/h = 0.4 \sim 0.5$ のところで節の位置に発達する。

(2) 完全発達した Sand wave の波高は重複波の節で底面に作用する最大流速 $u^* = u(1+r)/\sqrt{(S-1)gd_{s0}}$ が $5.0 \sim 6.0$ までは u^* の増加とともに高くなり、 u^* が同じであれば、周期が長い波ほど、同一周期の波では水深が深いほど発達する傾向がある。

(3) 発達限界は $u^* = 5.0 \sim 6.0$ のときでこのとき見かけの最大波形勾配 $H_d/\lambda_d = 0.06 \sim 0.07$ である。これは粒径の異なる Herbich の実験値とも大体一致する。 $u^* > 5.0 \sim 6.0$ では逆に減少する。

(4) ステップの発達していく海浜変形過程で砕波帯より沖側の地形は平均地形と上記のように発達する

Sand wave の重ね合せとして見る事が可能である。

(5) 砕波帯内では周期による影響が特に大きい。

本実験に用いた砂は 1 種類であり、砕波帯内のものについては戻り流れの影響を考慮に入れていないこと、底面における最大水粒子速度を微小振幅波理論により求めていること反射率として砕波前の波の平均値を使用していることなど今後さらに検討すべき問題が多い。

最後に貴重な助言を載いた鳥取大学野田教授、実験および資料整理に多大の協力を得た明治大学学生西田誠晃君に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Noda, H.: Model Study on the Filling-up of a Fishery Harbour by Drifting Sand, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., vol. 1, 1966, pp. 564~594.
- 2) 川村文三郎・山田紀男: マラッカ海峡の Sand wave, 地学雑誌, vol. 79, No. 5, 1970, pp. 24~37.
- 3) 細井正延・石田 昭・平山秀夫: 進行波による dune の発生に関する研究, 土木学会第 25 回年次学術講演会講演集, 1968.12, pp. 81~84.
- 4) 野田英明・川嶋康宏: 浅海重複波による質量輸送, 第 15 回海岸工学講演会講演集, 1968.12, pp. 24~29.
- 5) 野田英明: 波動境界層における質量輸送と海底の洗掘, 第 17 回海岸工学講演会講演集, 1970.11, pp. 59~66.
- 6) 中村慶一訳: 直交多項式, 応用回帰分析, 森北出版, 昭 45.3, pp. 151~162.
- 7) 川端幸蔵: 実験式と直交多項式, 農林水産研究のための統計的方法, 農林統計協会刊, 昭 43.1, pp. 55~59.
- 8) John B. Herbich, H.D. Murphy and VanWeele: Score of Flat Sand Beaches due to Wave Action in front of Sea Wall, coastal Eng. Santa Barbara Specialty Conf. 1965, pp. 705~725.
- 9) 前出 5),
- 10) D. Divoky, Le Méhauté and A. Lin: Breaking wave on gentle slope, Journal of Geographical Research, vol. 75, No. 9, 1970, pp. 1681~1692.